



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU V SOUČASNOSTI

PRESENT STATE OF INVESTMENT CASTING TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Jaroslav ŽUJA

VEDOUcí PRÁCE  
SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

BRNO 2013

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o současných metodách a inovačních technologiích vytavitelného voskového modelu. Práce dále popisuje literární rešerši v současnosti využívané metody a taky nabízí reálný pohled do budoucnosti s využitím nových metod. V začátku je stručně rozebrána historie metody, následně nové možnosti a technologie zkoušení struktur voskových směsí a jejich vlastností. A nakonec jsou uvedeny možnosti a cíle pro další inovaci metody.

### Klíčová slova

Technologie přesného lití, přesné odlitky, metoda ztraceného vosku, zkoušení vosků, keramická skořepina

## ABSTRACT

This thesis discusses the current methods and innovative technologies for lost wax model. The work also describes the literature search in currently used methods and also offers real insight into the future, using new methods. In the beginning is briefly discussed the history of the method, then new possibilities for technology testing and structures of wax blends and their properties. And finally, there are given opportunities and goals for the next innovation methods.

### Key words

Technology investment casting, precision castings, lost wax method, testing waxes, ceramic shell

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Žuža, Jaroslav. *Technologie vytavitelného modelu v současnosti*. Brno 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 42 s. příloh. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Technologie vytavitelného modelu v současnosti** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

\_\_\_\_\_  
Jaroslav Žuja

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto prof. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

**OBSAH**

ABSTRAKT .....	4
PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ .....	6
OBSAH.....	7
1. Úvod .....	9
2 Historie přesného lití.....	10
3 Technologie přesného lití.....	12
4 Výroba voskového modelu .....	13
4.1. Formy na modely a jejich výroba .....	13
4.1.1. Kovové formy:.....	13
4.1.2. Sádrové formy: .....	14
4.1.3. Formy z nízkotavitelné slitiny .....	14
4.1.4. Formy vyrobené galvanoplasticky .....	14
4.1.5. Formy vyrobené metalizováním .....	15
4.2. Voskové směsi.....	15
4.2.1. Rozdělení voskových směsí .....	16
4.2.2. Kontrola a zkoušky voskových směsí .....	16
4.2.3. Pokroky při testování vosků ovlivňujících jejich další rozvoj .....	18
4.2.4. Regenerace a rekonstituce vosků .....	21
4.3. Způsoby výroby voskových modelů .....	22
4.4. Sestavení voskových modelů .....	23
4.4.1. Pro jednotlivý model.....	23
4.4.2. Pro více modelů .....	24
5 Výroba skořepin .....	25
5.1. Složení skořepin .....	25
5.1.1. Plniva.....	25
5.1.2. Pojiva.....	26
5.2. Odmaštění voskového modelu .....	26
5.3. Obalování .....	26
5.3.1. Namáčení v obalové hmotě .....	26
5.3.2. Posyp modelů keramickým materiálem .....	27
5.3.3. Sušení nebo vytvrzování (chemické) .....	27
6 Vytavování vosku a žíhání skořepin.....	28

6.1. Vytavování vosku .....	28
6.2. Žihání skořepin.....	30
7 Odlévání kovu do skořepiny .....	31
8 Dokončující operace .....	33
8.1. Hrubé odstranění skořepiny .....	33
8.2. Oddělení odlitků od vtokového systému.....	33
8.3. Odstranění zbytků skořepiny .....	33
8.4. Dokončující operace .....	34
8.5. Kontrola jakosti odlitku .....	34
9 Pohled do budoucnosti.....	36
9.1. Povrchy se „žraločí kůží“ .....	36
9.2. Použití v lékařství .....	37
9.3. Použití v leteckém průmyslu .....	37
ZÁVĚR.....	38
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	39

## 1. ÚVOD

Metoda vytavitelného modelu „na ztracený vosk“ („lost wax“), nebo také přesné lití („investment casting“) je stará metoda (viz obr. 1), která se vyvinula ze specializované metody na metodu v dnešní době rozšířenou reflektující požadavky zákazníků na odlitky, jak z pohledu tvarové a rozměrové přesnosti, tak i materiálové náročnosti [1].

Lze ji začlenit mezi technologie near-net-shape, což jsou produkty blízké hotovým výrobkům, kdy se přeměna materiálu realizuje na tvary a rozměry blízkým hotovým výrobkům. Termín near-net-shape nelze chápat pouze jako prostředek k zajišťování přímé, účinné a ekonomické cesty k výrobě hotové součásti, ale rovněž jako úsporu drahých materiálů a energií [2].

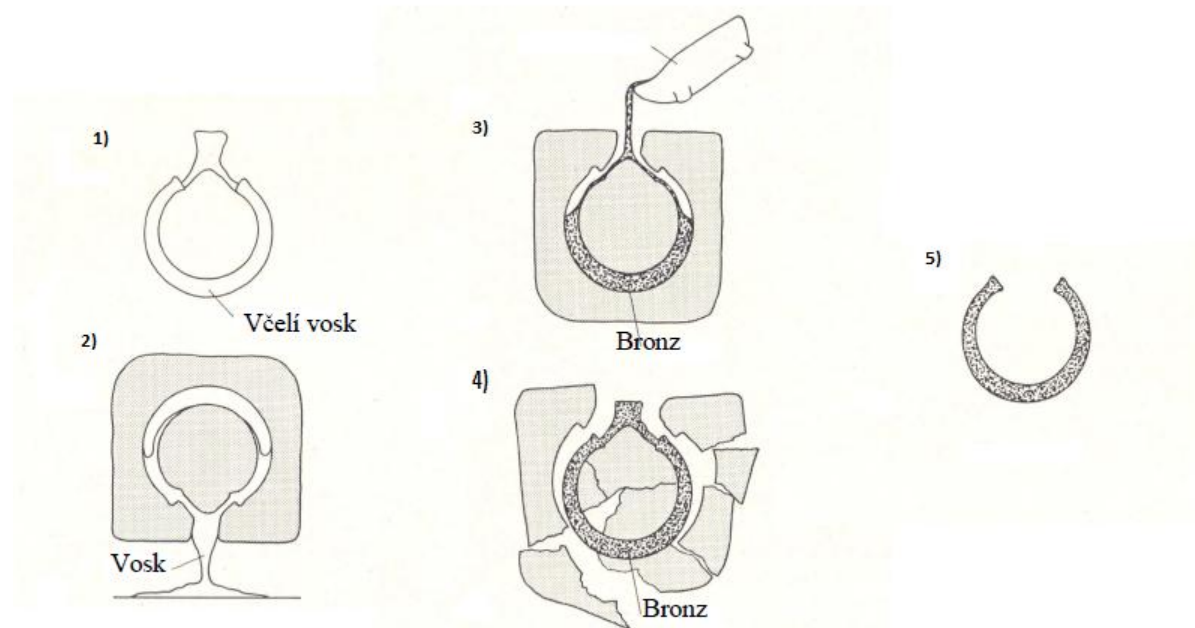
Při výrobě součástí se stále prosazují vyšší požadavky na jakost, kvalitu povrchu, rozměrovou přesnost, vnitřní čistotu, vyšší funkční parametry a to vše při silném tlaku na výrobní náklady. U některých strojírenských součástí se musí stále uplatňovat progresivní výrobní způsoby strojírenské metalurgie, které jsou schopny uvedené požadavky splňovat. Mezi progresivní způsoby lze zařadit také přesné lití vytavitelným modelem, které nabízí efektivním uplatnění umožňující podstatné úspory materiálu s minimálním použitím dalších dokončovacích výrobních operací [2].



Obr. 1 Bronzová hlava Královny Matky z kmene Benin v Nigérii  
(12 stol. n. l.) [3]

## 2 HISTORIE PŘESNÉHO LITÍ

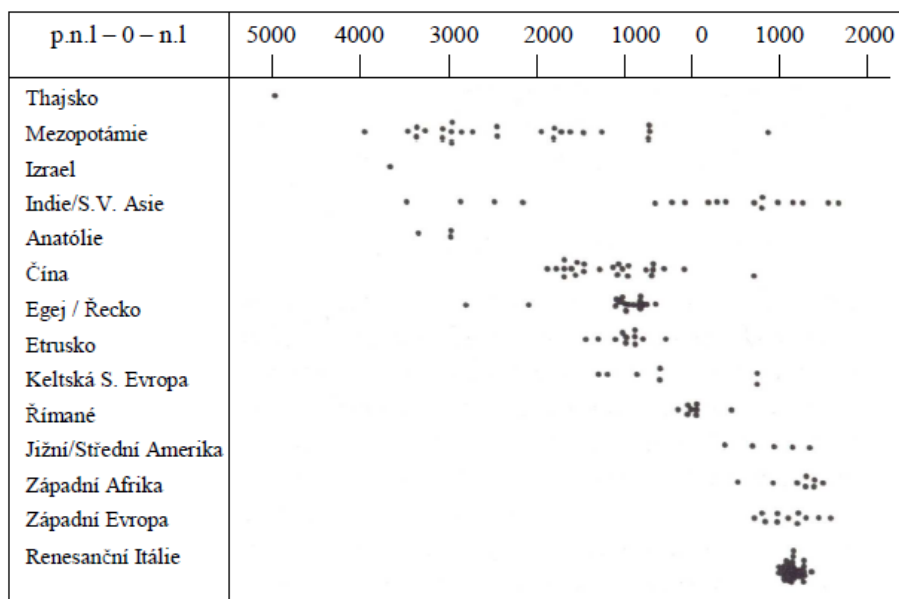
Základy technologie přesného lití, jsou známé už skoro přes 6 tisíciletí. Původní místo vzniku této metody není přesně známé. Asi 5-6 tisíc let před naším letopočtem používali umělci včelí vosk na zhotovení modelů (viz obr. 2), které obalili hlínou a po vypálení do takto vytvořených forem odlévali bronz [1][2].



Obr. 2 Postup zhotovení bronzového náramku metodou vytavitelného vosku [2]

Archeologické nálezy dále indikují Mezopotámii (okolo 3000 až 4000 let před Kristem), kde tehdejší civilizace byli obzvláště schopné v odlévání artefaktů ze zlata, stříbra a mědi. Dalším kandidátem je Thajsko, kde se domníváme, že metodu znali již 4500 let před Kristem. Dále Čína (2000 let před Kristem), Egypt (1400 let před Kristem). Kolem roku 0 již byla metoda známá po celém starověkém světě (viz obr. 3) [1].





Obr. 3 Odhadované stáří předmětů vyrobené metodou vytavitelného modelu [2]

Největší rozmach nastal v Renesanční Itálii (kolem roku 1620), asi nejznámější představitel je Benvenuto Cellini, který vytvořil hodně kovových soch právě danou metodou (viz obr 4). Po renesanci nastalo zapomnění metody přesného lití. Teprve až v letech 1940 až 1945 za druhé světové války se tahle metoda začala opět využívat.

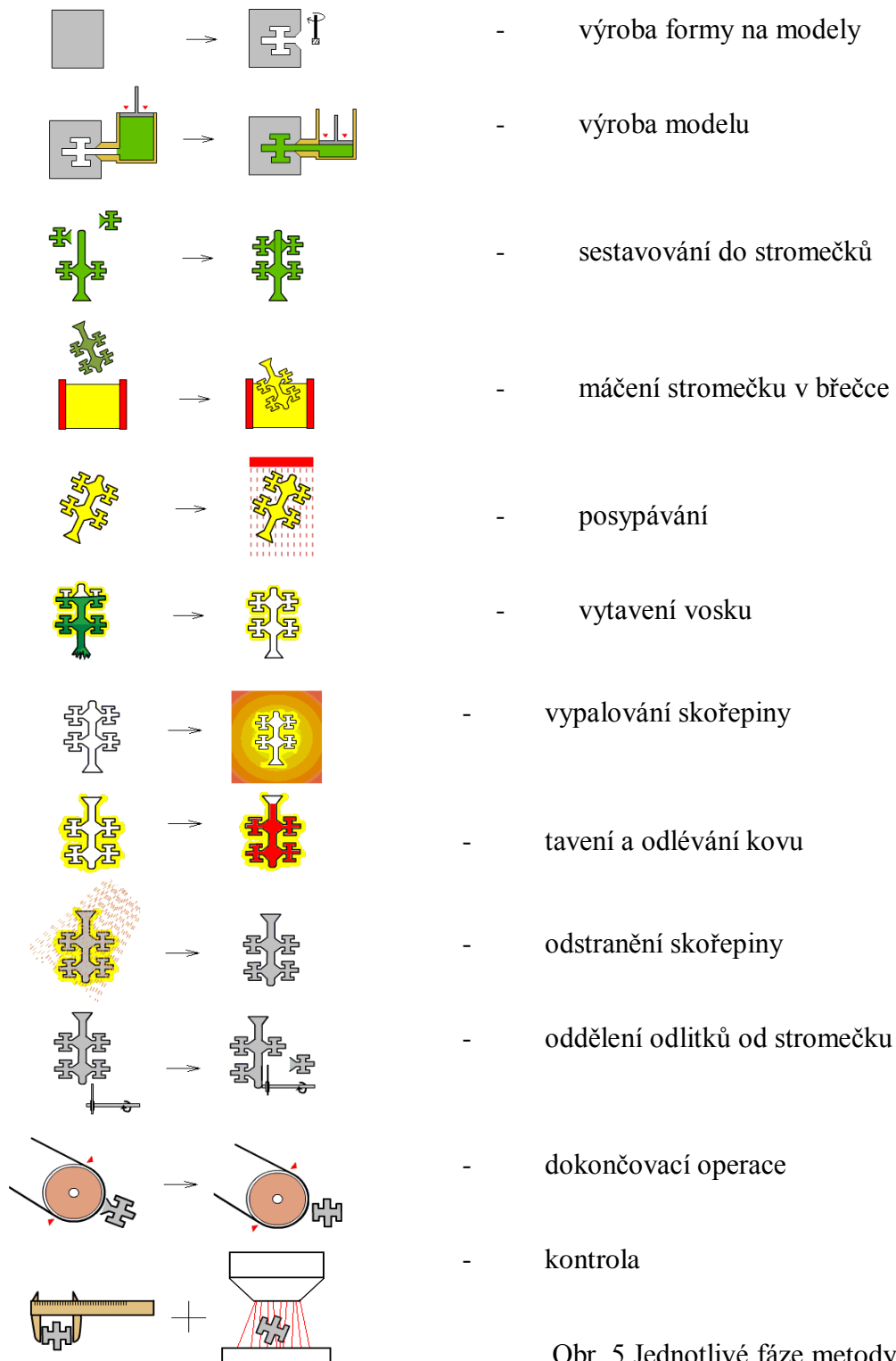


Obr. 4 Equestrian monument, renesanční Itálie, bronz, rok 1620 [1]

V dnešní době se přesné lití využívá především v leteckém, automobilovém zbrojním průmyslu, ale taky v dalších oborech. Nesmíme opomenout výtvarné umění, kterým vše začalo. Právě díky umění byly kladeny na přesně lité odlitky nejnáročnější požadavky na přesnost. Technologie a kvalita přesného lití je v dnešní době na vysoké úrovni, ale neustále se rozvíjí a zdokonaluje [1].

### 3 TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ

Výrobní proces je rozdělen do několika fází (viz obr. 5). V dalších kapitolách jsou jednotlivé fáze procesu postupně rozebrány [3].



Obr. 5 Jednotlivé fáze metody vytavitelného modelu[3]

## 4 VÝROBA VOSKOVÉHO MODELU

### 4.1. Formy na modely a jejich výroba [3],[5],[6]

Modelové zařízení je kritickým faktorem mezi výrobcem a jeho zákazníkem. Použité modelového zařízení má významný vliv na cenu a kvalitu odlitku. Požadavky na volbu modelového zařízení by měli obsahovat následující informace:

- Odhadovaný celkový počet kusů.
- Počet kusů v dávce
- Koncové použití odlitku
- Požadavky na kvalitu odlitku

*Formy na vytavitelný model musí splňovat následující požadavky:*

- Umožnit výrobu kvalitních zdravých modelů s bezvadným povrchem, bez staženin, vzduchových bublin, propadlin a ostatních povrchových vad.
- Zajistit požadovanou přesnost rozměrů modelu.
- Doba nutná k setrvání odstříknutých modelů ve formě musí být co nejkratší.

*Formy dělíme podle:*

- konstrukce
- účelu a použití
- stupně mechanizace
- způsobu výroby
- použitého materiálu pro výrobu formy

#### 4.1.1. Kovové formy:

Formy se především vyrábějí z oceli nebo slitin hliníku (viz obr. 6), a používají se u velkosériové výroby. Tyto formy se vyznačují dlouhou životností a velkou přesností. Pokud se vyskytují v modelu dutiny, tak se použijí výsuvné jádra. Náklady na výrobu takové formy jsou velmi vysoké.



Obr. 6 Forma ze slitiny hliníku [7]

#### 4.1.2. Sádrové formy:

Jsou vyráběny zalitím matečného modelu ze sádry (viz obr. 7). Používají se na výrobu jednotlivých modelů bez nároků na rozměrovou přesnost. Sádra má nízkou tepelnou vodivost a díky tomu se používají jen málo, protože tuhnutí odlitku trvá dlouho. Životnost forem je minimální a proto se často používají při ověřování navrhované technologie výroby. Nepoužívají se na vstřikovacích lisech, ale používají se na výrobu modelů volným gravitačním litím. Hlavní využití mají ve světě umění.



Obr. 7 Výroba formy zalitím modelu ze sádry [6]

#### 4.1.3. Formy z nízkotavitelné slitiny

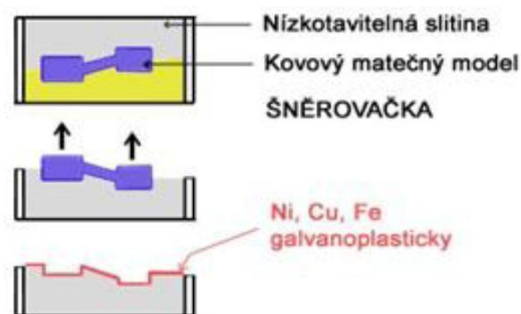
Jejich výroba spočívá v zalití kovového matečného modelu nízkotavitelnou slitinou, kdy matečný model je usazen v ocelovém plášti (viz obr. 8). Voskové modely vyrobené v takových formách mají kvalitní povrch a vyhovují po stránce rozměrové přesnosti. Mezi nevýhody patří nepříliš dlouhá životnost, proto se používají k výrobě menšího počtu voskových modelů. Výhodou je relativně jednoduchá a rychlá výroba. Používají se v nízkosériové výrobě.



Obr. 8 Forma z nízkotavitelné slitiny [6]

#### 4.1.4. Formy vyrobené galvanoplasticky

Jsou vyráběny jako kovové skořepiny z niklu, mědi nebo železa v galvanické lázni, kde se na model nabalí vrstvička kovu o 0,4 až 4 mm tlustá a poté se zalije epoxidovou pryskyřicí (viz obr. 9). Tyto formy lze použít na komplikované a velmi přesné modely, jejichž váha není příliš velká. Nehodí se na výrobu modelů se zářezy, otvory a hlubokými drážkami.

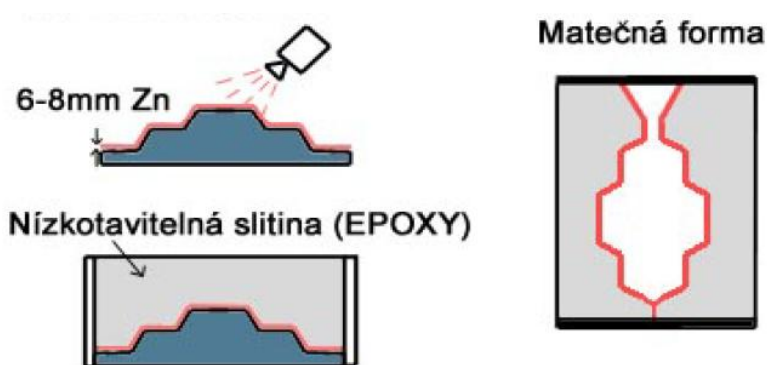


Obr. 9 Výroba formy za použití galvanoplastiky [6]

#### 4.1.5. Formy vyrobené metalizováním

Princip výroby spočívá ve vrhání a natavení roztavených částic kovu metalizační pistolí na povrch matečného modelu, kde se rozprášené tekuté částice, které jsou nosným plynem vrhány na základní materiál a vlivem kinetické energie se deformují, spojují a vytváří pevnou souvislou vrstvu, která přesně reprodukuje všechny tvary (viz obr. 10).

Kov se taví plamenem, nebo obloukem. Tloušťka vrstvy je okolo 3 mm. Nejčastěji se jako médium používá zinek. Takto vzniklá kovová skořepina je zalita epoxidovou pryskyřicí plněnou kovovým práškem nebo nízkotavitelnou slitinou. Životnost forem je vysoká, v závislosti na složitosti formy se pohybuje v rozmezí od 10 000 do 100 000 vstřiků [1].



Obr. 10 Výroba formy pomocí metalizace [6]

#### 4.2. Voskové směsi [6][9]

Voskové modely se zhotovují z voskových směsí (viz obr. 11), protože samostatný vosk nesplňuje všechny požadavky kladené na modelovou hmotu. Moderní voskové směsi jsou sloučeniny více komponentů, jako je syntetický vosk, přírodní vosk – uhlovodík, přírodní vosk – ester, přírodní a syntetická pryskyřice, montážní vosk, organické plnivo a voda. Existuje více variant takových sloučenin, které splňují požadavky; vlastnosti kladené na voskové směsi, jako je bod tavení, tvrdost, viskozita, roztahování/smršťování.

K výrobě voskových modelů existuje několik druhů voskových směsí lišící se použitelností a vlastnostmi.



Obr. 11 Voskové směsi [3]

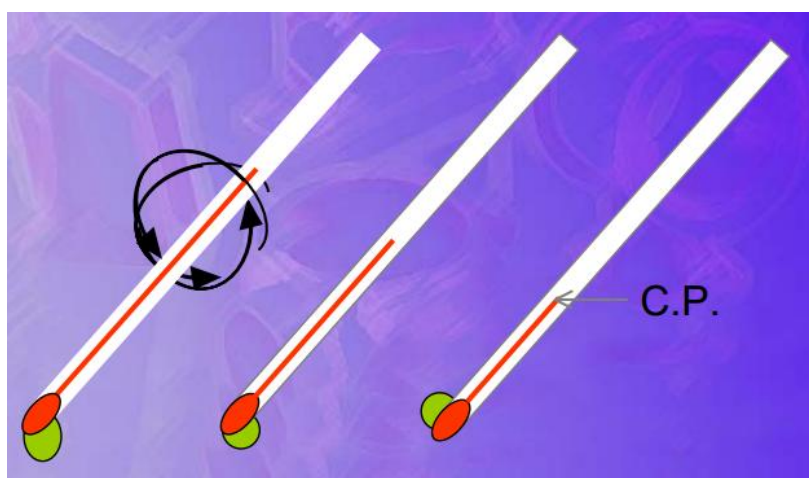
#### 4.2.1. Rozdělení voskových směsí

- Neplněné (přímé) modelové vosky**- umožňují odstříkovat v širokém rozsahu teplot, snadná regenerace a rekonstituce, nízký obsah popela, kvalitní povrch
- Emulgované modelové vosky**- podobné vlastnosti jako neplněné vosky, navíc obsahují plnivo, kterým může být voda nebo vzduch. Obsah plniv se pohybuje kolem 7-12%
- Plněné modelové vosky**- v současnosti patří v nejpoužívanější modelové vosky, vhodné pro tenkostěnné modely. Plnivem je ve vosku nerozpustný prášek, a jeho obsah se pohybuje kolem 20-40%.
- Vosky na vtoky**- skoro stejný složení jako neplněné vosky, směs se upravena tak, aby měla vyšší pevnost, aby mohla unést hmotnost modelu.
- Vodou rozpustné vosky**- jedná se o vosky ze speciálních látek, které jsou rozpustné ve vodě nebo ve slabých kyselinách. Určené pro výrobu vodou vyplavitelných jader. Dobře se odstříkují a jsou rozměrově stabilní.
- Namáčecí vosky**- vosky s nízkou viskozitou určené pro zmenšení nebezpečí vzniku trhlin u skořepin při vytavování vosku v autoklávu.
- Vosky na lepení**- převážně na slepování částí modelů a přilepování modelů ke vtokům. Vyznačují se vysokou adhezí.
- Vosky na opravy**- určeny k opravování poškozených modelů

#### 4.2.2. Kontrola a zkoušky voskových směsí [9][10][11]

Voskové směsi je třeba kontrolovat, neboť nekvalitní voskový model znamená vždy vadný odlitek, i v případě že ostatní technologie budou bezchybné [1].

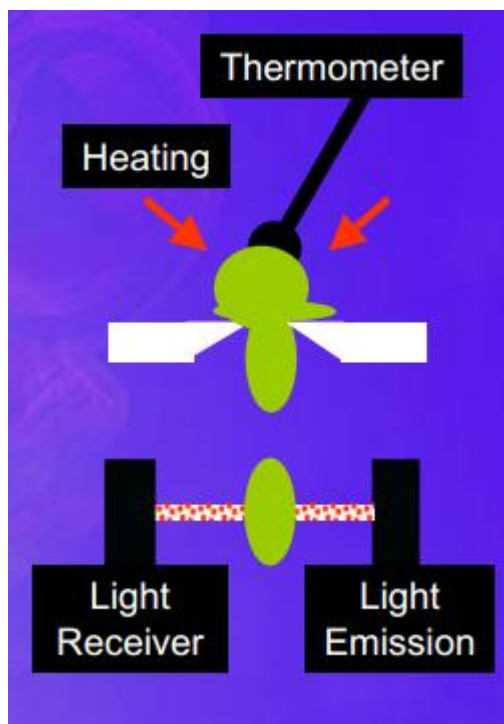
- A) **Bod tuhnutí**- je to teplota, při které natavený vosk přestává téct vlivem gravitace (viz obr. 12).



Obr. 12 Bod tuhnutí voskové směsi [11]



- B) **Bod skápnutí**- postupným pomalým ohřevem se dosáhne toho, že ukápně první kapka vosku a ta teplota, při které se to stane je zaznamenána (viz obr. 13).



Obr. 13 Zkouška bodu skápnutí [11]

(HEATING-ohřev; THERMOMETER- termometr; LIGHT RECEIVER- světelný přímač; LIGHT EMISSION-světelný vysílač)

- C) **Obsah plniva**- s rostoucím obsah plniv se mění vlastnosti vosku
- D) **Obsah popela**- touto zkouškou se zjišťuje obsah popelovin, které jsou nežádoucí. Vosky s vysokým obsahem popela mají viditelné defekty na výsledných modelech. Maximální stanovený obsah popela byl stanoven na 0,05%.
- E) **Penetrace**- je to vlastně zkouška tvrdosti vosku za určité teploty, obvykle se provádí za teploty 25° C. Pak se jehla zatížená 200g po dobu 5 sekund zarazí do materiálu.
- F) **Statická zkouška ohybem**- měření mechanických vlastností. Důležité zejména pro stanovení chování při manipulaci a skládání do stromečků apod.
- G) **Viskozita**- Viskozita se zjišťuje v blízkosti bodu tuhnutí, protože se právě za této teploty vstříkuje.
- H) **Rozměrová analýza (smrštění)**- ideální vosk by měl mít smrštění nulové, nebo alespoň rozdílnost mezi výsledky by měla být minimální. Každý rozměr se smršťuje jinak, proto slévárny mají vždy pro tuto zkoušku speciální tělesa, tvarově podobná jejich produktům.

**I) Zkouška zabíhavosti-** používá se spirála, do které, je vstříknuta za známých podmínek (rychlost, teplota, tlak) směs (viz obr. 14).

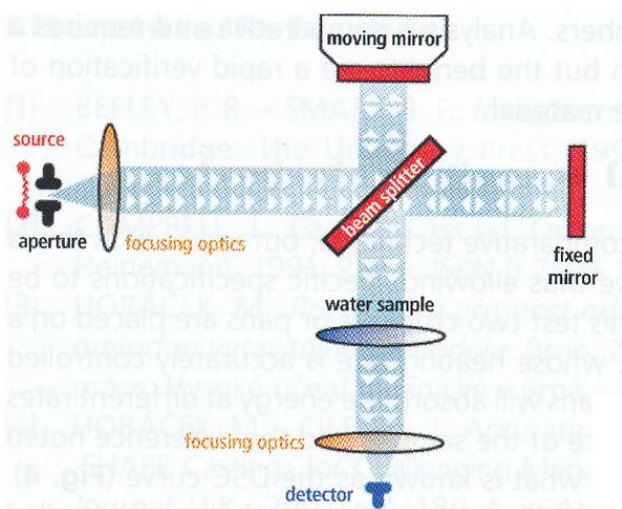


Obr. 14 Spirála pro zkoušku zabíhavosti voskových směsí [9]

#### 4.2.3. Pokroky při testování vosků ovlivňujících jejich další rozvoj [10]

##### 1) *Fourierovo transformační infra-červené záření*

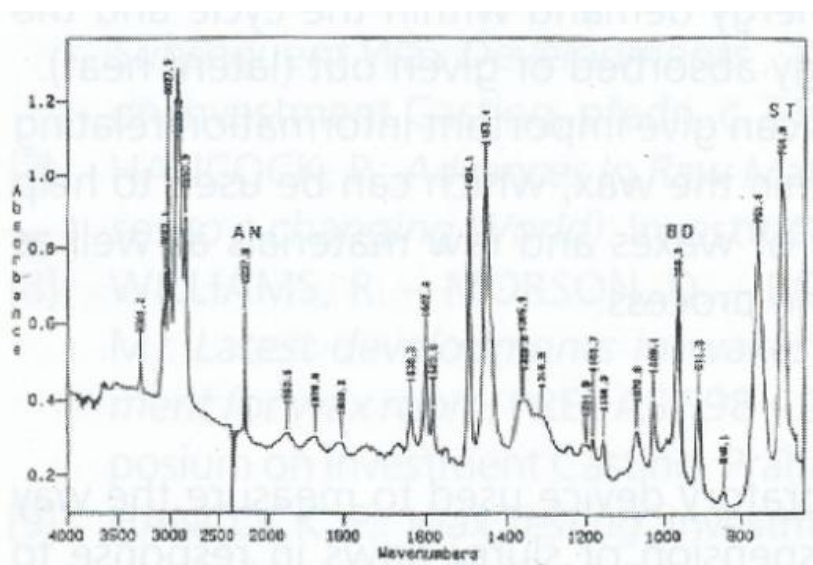
V tomto testu je paprsek rozdělen na 2 směry. Jeden pak prochází měřeným vzorkem, zatímco druhý pak jde přímo do přijímače, kde je srovnán s paprskem, který prošel vzorkem (viz obr. 15). Software vyhodnotí frekvence těchto vstupů a rozdíl, který charakterizuje vzorek daného materiálu, ten pak zaznamená (viz obr 16). Je to v podstatě kontrola otisku daného vzorku. Jedná se o velmi rychlé porovnání materiálu s materiálem, který je již uložen v databázi. Vlastní vyhodnocení je pak na pracovníkovi.



Obr. 15 Schéma metody FTIR [10]

(MOVING MIRROR - pohyblivé zrcadlo; FIXED MIRROR- nepohyblivé zrcadlo; SOURCE- zdroj; APERTURE- světelnost; FOCUSING OPTICS- zaměřovací optika; BEAM SPLITTER- dělič paprsků; WATER SAMPLE- vzorek vody; DETECTOR- detektor)

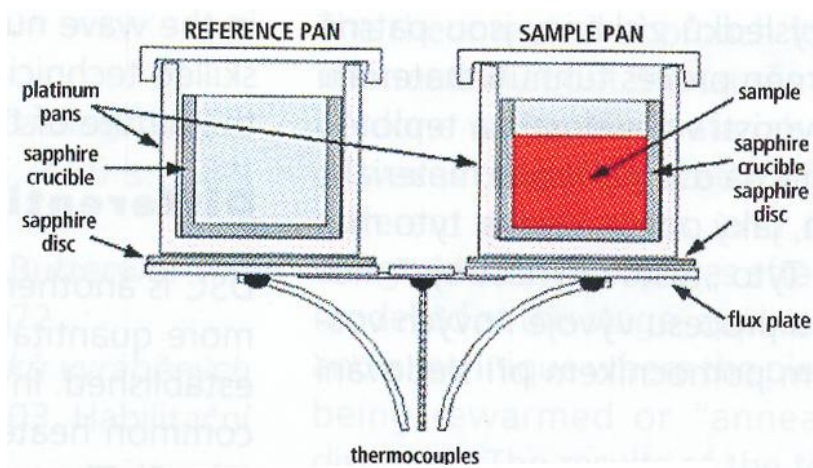




Obr. 16 Výsledný otisk vzorku z FTIR [10]

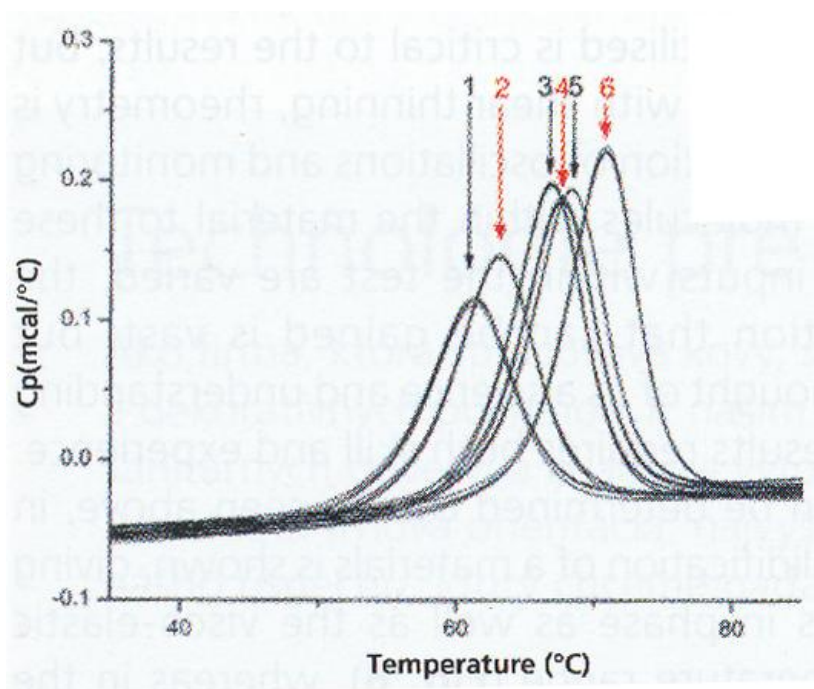
## 2) Diferenciální skenovací alometrie

Je to opět komparativní metoda, ale nyní více kvantitativní. V tomto testu jsou 2 kelímky umístěny na společný ohřívač s přesně regulovatelným ohřevem (viz obr. 17). Kelímky budou pohlcovat energii různou rychlostí vzhledem k přítomnosti vzorků a tento rozdíl je vyhodnocen programem do závislosti známé pod pojmem DSC křivka (viz obr. 18). DSC je důležitou zkouškou, protože podává informace o voscích v následujících oblastech: krystalizace, bod měknutí materiálu, oblasti cyklu s požadavkem na maximální energie a celková absorbovaná, nebo naopak vydaná energie.



Obr. 17 Kelímky na společném ohřívači [10]

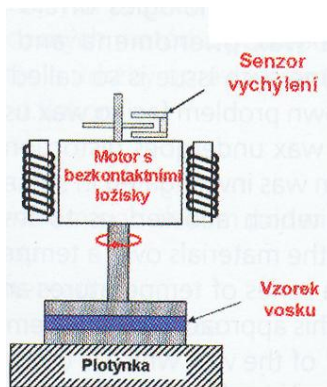
(REFERENCE PAN- pánev s porovnávacím vzorkem; SAMPLE PAN- pánev s měřeným vzorkem; SAMPLE- vzorek; PLATINUM PANS- platinový kelímek; SAPPHERE CRUCIBLE- safírový kelímek; SAPPHERE DISC- safírový disk; FLUX PLATE- otočná deska; THERMOCOUPLES- termočlánky).



Obr. 18 Ukázka DSC křivky (závislost pohlcené energie na teplotě) [10]

### 3) Reometrie

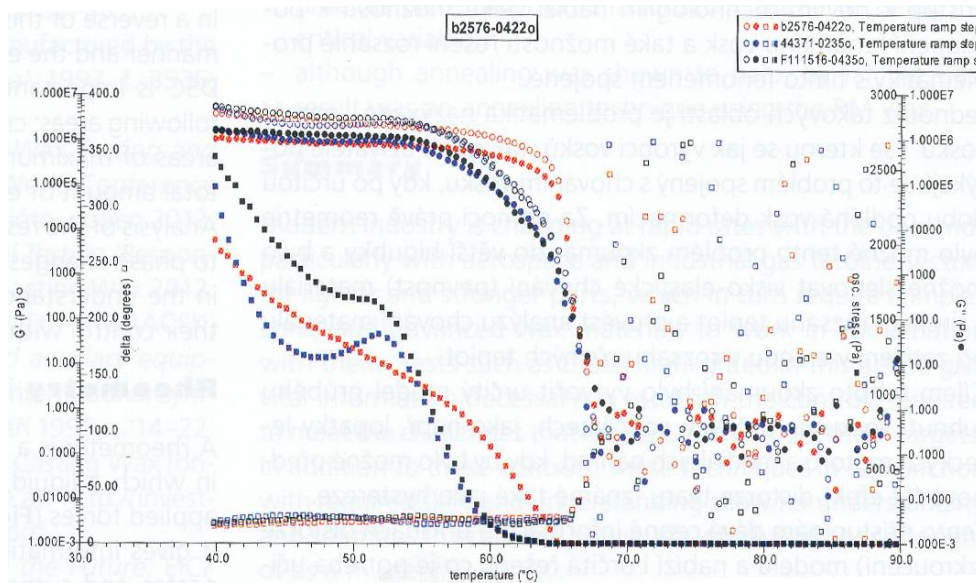
Jedná se o metodiku na zjištění geometrických vlastností tj. toho, jak kapaliny, suspenze nebo břečky reagují na aplikované silové zatížení. Metoda je založená na aplikaci oscilačních zatížení a monitoringu odporu molekul v materiálu proti těmto silám. Příprava začíná tak, že se roztavený voskový vzorek je v přístroji umístí mezi vřetenem, aplikující deformaci, a vyhřívanou plotýnkou, zajišťující správnou teplotu vosku (viz obr. 19). Po nastavení parametrů započne vlastní měření (viz obr. 20). Voskový model je vystavován deformaci sinusového průběhu a jeho teplota je postupně snižována. Senzor změří výchylku a počítač dopočítá rychlost, a vše zaznamená (viz obr. 21). Na rozdíl od měření viskozity, kterému je měření velmi podobné, zůstává díky minimálním deformacím struktura skoro nedotčená.



Obr. 19 Schéma reometru [10]



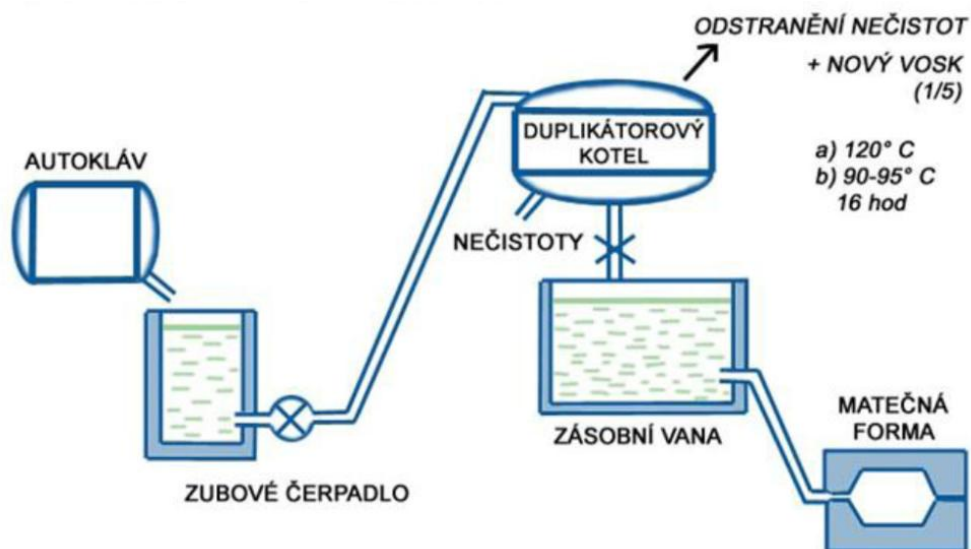
Obr. 20 Ukázka reometru s kontrolovaným smykovým napětím [10]



Obr. 21 Příklad výsledků z reometru (model při aplikaci síly na dva podobné materiály, tedy informace o tom jaký kladou odpor, při různých teplotách). [10]

#### 4.2.4. Regenerace a rekonstituce vosků

Obnova vosků se zařadila mezi důležité obchodní činnosti dodavatelů. Dříve se regenerované vosky používaly jen na výrobu vtoků a nálitků, ale v dnešní době regenerované vosky mají vlastnosti skoro jako panenské vosky (viz obr. 22).



Obr. 22 Regenerace voskové hmoty [6]

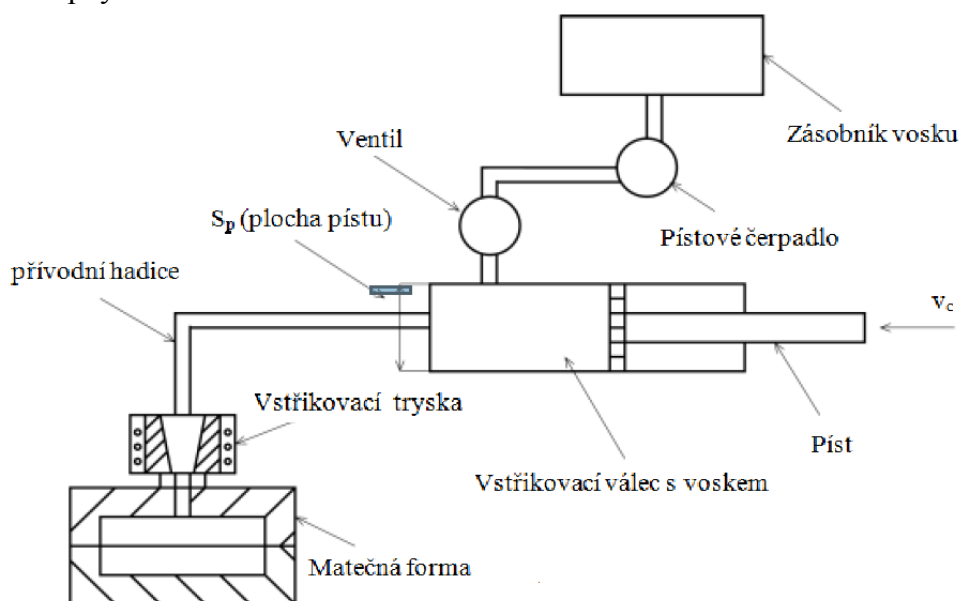


### 4.3. Způsoby výroby voskových modelů [2],[3],[6]

-Voskové modely se vyrábějí dvěma způsoby:

**1) gravitačním litím do formy** - Je používáno už jen velice zřídka a to většinou při výrobě pomocných modelů jako jsou např. vtokové kanály apod.

**2) vstřikováním do formy** - výroba voskových modelů vstřikováním vosku do formy je hlavní metodou výroby voskových modelů. Výroba se uskutečňuje na speciálních vstřikovacích lisech (viz obr. 23 a obr. 24), které vstřikují roztavený vosk pod tlakem do formy (viz obr. 25). Teplota vosků při vstřikování je v rozmezí 55 – 90°C. Po ztuhnutí je model vyjmut z formy. Vstřikovací lisy jsou klasifikovány dle stavu vosku, který je stroj schopný vstřikovat.

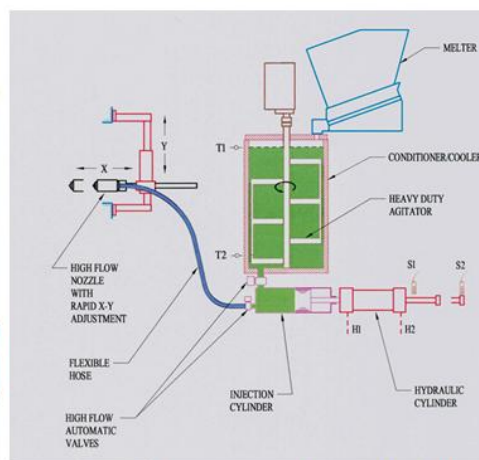


Obr. 23 Schéma vstřikovacího stroje [6]



Obr. 24 Vstřikovací stroj [6]

( 5T- with side injection and shuttle table- stroj s bočním vstřikováním a se stolem s pojezdem, Vari-flow controls-display pro kontrolu proudu, 150T-with side and bottom injection, shuttle table and 4 injection cylinders- 150T s bočním a spodním vstřikováním, pojízdný stůl a 4 vstřikovací bubny)



Obr. 25 Zařízení pro výrobu modelu [6]

(MELTER-Tavicí jednotka, CONDITIONER, COOLER-Kondicionér, chladič, HEAVY DUTY AGITATOR-Michadlo, HYDRAULIC CYLINDER-Hydraulický bublen, INJECTION CYLINDER-vstřikovací bublen, HIGH FLOW AUTOMATIC VALVES-Rychloproudový automatický ventil, FLEXIBLE HOSE-ohebná hadice, HIGH NOZZLE WITH RAPID X-Y ADJUSTMENT-Rychloproudová tryska s Velkým X-Y uspořádáním)

Existují tři základní typy strojů pracujících s voskem. Dělí se podle stavu vosku, se kterým pracují, na:

- stroje pracující s tekutým voskem
- stroje pracující s kašovitým voskem
- stroje pracující s pevným voskem

Parametry stroje pro výrobu kvalitních voskových modelů:

- **Teplota vosku ve vstřikovacím stroji** – měla by být konstantní v celém stroji (teplota vosku v zásobníku by měla být stejná jako teplota vosku v trysce).
- **Vstřikovací tlak** – měl by být dostatečně vysoký k zajištění kvalitního povrchu voskového modelu.
- **Průtoková rychlost** – měla by být tak vysoká, aby vosk dostatečně rychle vyplnil formu, ale zároveň by měla být dostatečně pomalá k zabránění turbulenci a vzniku vzduchových bublin.
- **Doba vstřikování a doba výdrže** - měla by být dostatečná k zajištění kvalitního povrchu voskového modelu.

#### 4.4. Sestavení voskových modelů [3],[6]

Modely se vyrábějí ve formách většinou jednotlivě a musí se připojit na vtokovou, popřípadě na nálitkovou soustavu. Děje se tak po „vyzrání“ (stabilizaci) voskového modelu (min 24 hod). Podle počtu modelů v jedné licí soustavě se rozlišují:

##### 4.4.1. Pro jednotlivý model



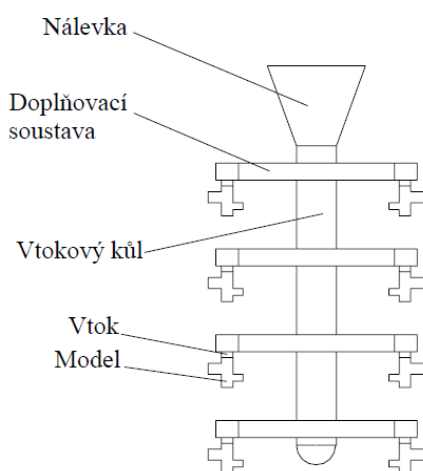
Používají se u rozměrnějších odlitků nad 2 kg, nebo pro složité členité odlitky (viz obr. 26). Vtoková soustava, která má různé druhy nálitků, se vyrábí ve zvláštních formách a na model se připojí pájením, nebo lepením.

Obr. 26 Sestava jednoho modelu [12]

#### 4.4.2. Pro více modelů

Modely se na vtokovou soustavu připojují buď lepením, nebo pájením. Při lepení se užívá pistole, které ke spojení modelu a vtokového systému používá roztavené lepidlo, které je nanášeno na stykové plochy. Při pájení se modely připojí na vtokovou soustavu tak, že se mezi vtok modelu a vtokový systém vloží pájedlo, model se přitlačí na pájedlo, které je přiloženo na místo vtokového systému, kde bude model připojen. Po natavení dosedacích ploch se pájedlo vytáhne a model se přitiskne k vtokovému systému.

Tvar stromečku by měl být navržen tak, aby byl k připojení modelů umožněn dobrý přístup, aby při obalování se vytvořila dostatečná skořepina (viz obr. 27 a obr. 28).



Obr. 27 Jednotlivé části stromečku [3]



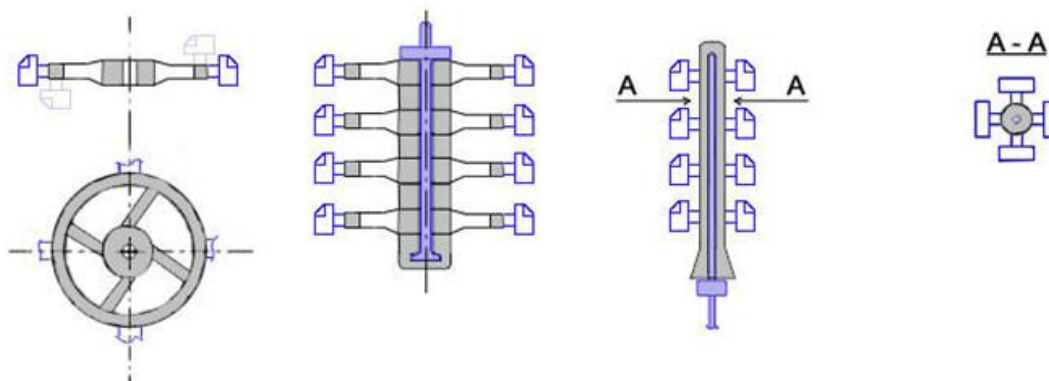
Obr. 28 Stromeček [13]

Nevhodné sestavení by mohlo vadit při finální oddělování vtokové soustavy a podobně. Z hlediska následující operace obalování by měli být modely na stromečku přilepeny dutinami dolů (viz obr. 29). Obalová hmota musí stékat, aby nedocházelo ke zvětšování tloušťky obalu v dutinách, která ovlivňuje nepříznivě posunutí tepelné osy následkem nahromadění žhavé keramiky [4].

#### Stromečkové sestavy

a) modely sestavené horizontálně - etážově

b) modely přímo na vtokový kanál



Obr. 29 Stromečkové sestavy [6]

***Tvar stromečku ovlivňuje:***

- 1) Způsob připojení modelů
- 2) Technika obalování
- 3) Způsob vytavování
- 4) Způsob lití
- 5) Oddělování odlitků od vtokové soustavy
- 6) Standardizace vtokových soustav

Sestavení modelů a vtoková soustava musí dovolit bezproblémové vytékání vosku při vytavování modelů ze skořepiny. Není-li možné vhodnou polohou modelu na stromečku dosáhnout dokonalého odstranění vosku, je potřeba k modelu připojit pomocný výfuk, který umožní odstranění vosku z formy [4]. V případě že ani pomocný výfuk nestačí k dokonalému odstranění vosku je potřeba vytvořit na vtokové soustavě nebo modelu pomocné výtokové otvory. Aby bylo možno pomocné výtokové otvory vytvořit bez poškození odlitku, musí mít model výstupku vhodný tvar. Po vytavení vosku se pomocné výtokové otvory důkladně zatmelí.

## **5 VÝROBA SKOŘEPIN [1],[3],[5],[8]**

Všechny výhody, ale také problémy jsou dané právě výrobou přesné skořepiny, která umožňuje vyrábět širokou škálu odlitků, o velké přesnosti, tenkých stěnách za použití široké škály slitin. Jsou zde, ale také jisté problémy s vysokým koeficientem tepelné roztažnosti vosku, zatímco keramika má nízký koeficient tepelné roztažnosti. Zde vzniká jistá nevyváženost, která musí být kontrolována. Jedním z důsledků rozdílné tepelné roztažnosti vosku v porovnání s keramikou je to, že kdykoliv po výrobě skořepiny při zvýšení okolní teploty, může uzavřený voskový model způsobit praskání okolní křehké keramiky. Většina obaloven proto teplotu neustále monitoruje.

### **5.1. Složení skořepin**

Charakteristickým znakem metody vytavitelného modelu je nedělená forma. Model použitý pro zhotovení formy se vždy zničí vytavením a je tedy pro každou formu nutno použít nový model. Keramická jádra se vkládají do voskových modelů, nejčastěji zastříknutím při výrobě.

#### **5.1.1. Plniva**

Pro výběr vhodného žáruvzdorného materiálu jsou směrodatné následující vlastnosti:

- Tepelná roztažnost.
- Teplota tavení.
- Chemická netečnost vůči odlévaným kovům.

Na výrobu skořepin se jako žáruvzdorné materiály používají hlavně kysličníky a křemičitany. Pro praktické průmyslové použití se z kysličníků využívá především  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – oxid hlinitý,  $\text{ZrO}_2$  – oxid zirkoničitý. Z křemičitanů se využívá nejvíce mulitu, zirkonu,

silimanitu a hlavně molochitu, je to v podstatě mullit (56%) ve sklovité obálce amorfního kyslíčnicku křemičitého (44%).

### 5.1.2. Pojiva

Pojiva (vazná kapalina) spolu se žáruvzdorným materiálem tvoří vlastní obalovou hmotu pro výrobu keramických skořepinových forem. Pojivo má mít následující vlastnosti:

- Nesmí snižovat žáruvzdornost formy.
- Musí předat formě po ztuhnutí dostatečnou pevnost jak po vysušení, tak po vypálení.

Jako pojiva formovacích hmot na skořepinové formy se používají především koloidní roztoky oxidu křemičitého, dále také organické sloučeniny hliníku, titanu, zirkonu a některé sloučeniny anorganické. Křemičitanová pojiva jsou buď na lihové, nebo vodné bázi. Systém založený na vodní bázi používá k sušení vzduch a nejvíce se používá pro primární obaly. Vodní báze má oproti alkoholové bázi delší dobu sušení. Rychlost vypařování má vliv na kvalitu primárního obalu a nakonec tedy i na povrch odlitku. Pojiva na alkoholové bázi nemají výhodu pouze v rychlejšímu sušení, ale také ve vytvrzování, které je zajištěno působením plynného prostředí – amoniakem.

### 5.2. Odmaštění voskového modelu

Před obalováním je nutné odstranit z povrchu voskového stroměčku zbytky dělicího prostředku, jinak první obal k povrchu voskových modelů dokonale nepřilne; vyschlý obal pak vlivem prnutí popraská, odlupuje se a bude příčinou defektů.

### 5.3. Obalování

Obalování spočívá v opakovaném namáčení modelových stroměčků do obalové hmoty, posypávání žáruvzdorným materiálem o vhodné zrnitosti a sušení jednotlivých obalů. Tento cyklus se opakuje 5 až 15 krát, dle požadované tloušťky.

#### 5.3.1. Namáčení v obalové hmotě

Při namáčení se čisté voskové stroměčky pozvolna ponořují do obalové hmoty při současném otáčení a naklánění tak, aby obalová hmota rovnoměrně pokryla stroměček, a aby se ne vytvořily v koutech, rozích nebo drážkách vzduchové polštáře, nebo aby tam neulpěly vzduchové bublinky. Potom se stroměček (sestava) z obalové hmoty vyjme a manipuluje se s ním tak, aby se, obalová hmota rovnoměrně rozdělila a přebytečná odkapala (viz obr. 30).

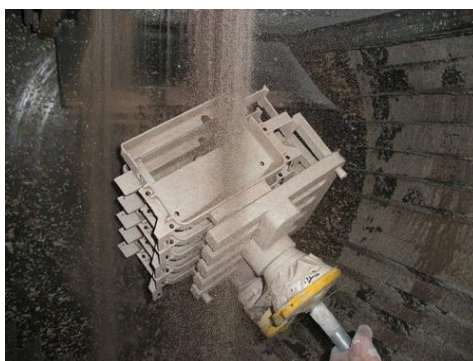


Obr. 30 Namáčení voskového modelu v břečce [14]



### 5.3.2. Posyp modelů keramickým materiálem

Následuje posypávání žáruvzdorným materiálem, které se dříve provádělo mechanicky proudem proudu volně padajících částic (viz obr. 31). Dnes se posypává fluidně, ponořením do vzduchem načeřeného posypového materiálu. Na první dva lícní obaly, které rozhodují o kvalitě povrchu odlitku, se používá jemný zásypový materiál se zrnitostí většinou 0,1 až 0,25 mm, na další obaly pak 0,25 až 0,5 mm.



Obr. 31 Posypání modelů keramickým materiálem [15]

### 5.3.3. Sušení nebo vytvrzování (chemické)

Po namočení a posypání dochází k tunutí obalu. Obaly tuhnou buď jen odpařením disperzního prostředí z kapalného pojiva, které vyvolá stavovou změnu soli v gel, nebo k této změně dojde působením chemického činidla (urychlení) a odpaření disperzního prostředí následuje později.

První metoda je realizována sušením (viz obr. 32), druhá je základem tzv. rychloprocesů. Při sušení musí každý obal schnout v klimatizovaném prostoru při teplotě 20 až 24°C a při vlhkosti 50 až 70%.



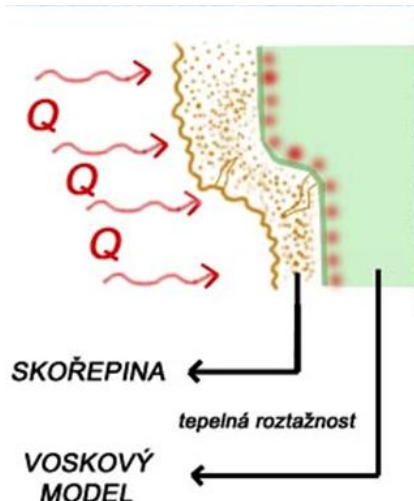
Obr. 32 Sušení keramických skořepin [16]

Moderní metody pracují s tzv. chemickým tvrzením obalů (*rychloprocesy*). Jedná se o různé způsoby urychlování relace. Značného zkrácení relace je dosahováno použitím alkalicky reagujících látek (nejčastěji čpavku). Posypané obaly se pak suší krátkou dobu na vzduchu (volně), poté se vystaví krátkou dobu působení plynného čpavku. Poté následuje odstranění čpavkových par z obalu působením proudu vzduchu, nové namočení, odkapávání, posypání atd. až má skořepina potřebnou tloušťku. Pak se suší dle rozměrů skořepiny 3 až 8 hodin. Nevýhodou vytvrzování obalů čpavkem je toxicita par čpavku.

## 6 VYTAVOVÁNÍ VOSKU A ŽÍHANÍ SKOŘEPIN

### 6.1. Vytavování vosku

Po finálním vytvoření obalu a jeho vysušení skořepiny se z ní musí voskový model odstranit. V této části procesu je možnost zjistit existující vady (praskliny) na formě, protože vosk má tendenci detekovat tyto chyby, obzvláště když je používán tmavý vosk, který prosákne skrz formu a zobrazí se jako skvrna na povrchu formy [3]. Klíčovým problémem této části procesu je dilatační rozdíl mezi keramikou vrstvou a voskem. Kdybychom obalenou formu jednoduše vložili do pece za účelem vytavení vosku (bod tavení 60 – 90°C), tak by došlo k jejímu popraskání. Ohřev vosku musí být proto rychlý, tím se vytvoří tenká vrstva, tzv. dilatační spára (viz obr. 33). Která zachycuje veškeré deformace vosku, a tím chrání skořepinu před popraskáním.

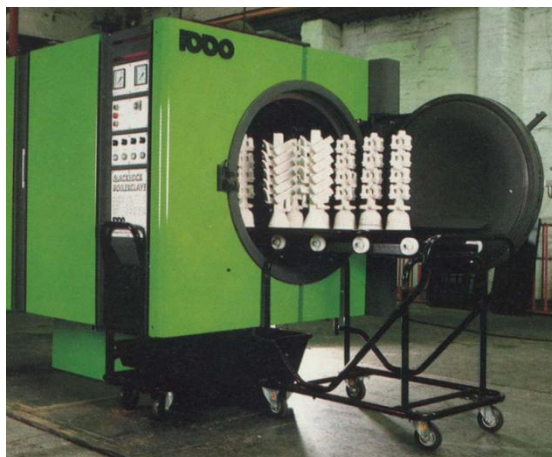


Obr. 33 Dilatační spára [6]

#### Metody pro vytavování vosku:

- **Za nízké teploty** [6] – vytavování se provádí v roztavené a přehřáté lázni nízkotavitelného kovu. Stejného složení jako má hmota modelů po dobu 10 až 15 minut. Častým způsobem je i vytavování ve vroucí vodě. Výhodou je malé riziko popraskání. Nevýhodou je délka procesu (10 až 20 minut).
- **Za vysoké teploty** – provádí se v peci za teploty 800 až 1000°C, kde dochází zároveň k vypalování i vytavování. Ztráty vosku jsou 10 až 15%. Vosková směs je částečně znehodnocována. Doba trvání se pohybuje od 10 do 20 minut.
- **Dielektrickým ohřevem** – skořepiny se zvlhčí vodou a pak se umístí v poli vysokofrekvenčních oscilací. Vlhká skořepina se rychle ohřeje, vosk se těsně u skořepiny odtaví a vytvoří se dilatační spára, jež zabrání popraskání skořepiny rozpínajícím se voskovým modelem. U této metody je možná automatizace.
- **Horkým vzduchem** [3] – proud horkého vzduchu se zavádí do středu vtoku. Ten se protaví dříve než se celý model ohřeje a k odtavování pak dochází z vnitřku.

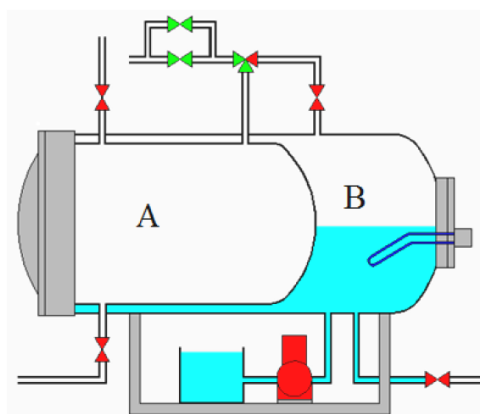
• V **autoklávu** – V současnosti je to nejpoužívanější metoda. Vytavení modelů se provádí tepelným šokem přehřátou párou v zařízení, které se nazývá autokláv nebo boilerkláv (viz obr. 34). Protože teplota páry závisí na jejím tlaku, používají se zařízení, která pracují s tlaky od 0,6 až 0,8 MPa při teplotě páry od 160 do 170°C. Skořepiny jsou v autoklávu umístěny tak, aby z nich vosk mohl volně vytékat. Vytavený vosk se zachycuje ve sběrné nádobě a po regeneraci se znovu používá. V dnešní době jsou zařízení vybavena sadou kontrolních a bezpečnostních prvků, které kontrolují výkon, přetlak, těsnost apod.



Obr. 34 Vytavování vosku v boilerklávu [9]

Výhody tohoto způsobu odstraňování modelů jsou menší ztráty na modelovém vosku, menší množství popraskaných skořepin a možnost pracovat s tenčími skořepinami. A lepší kvalita povrchu odlitků.

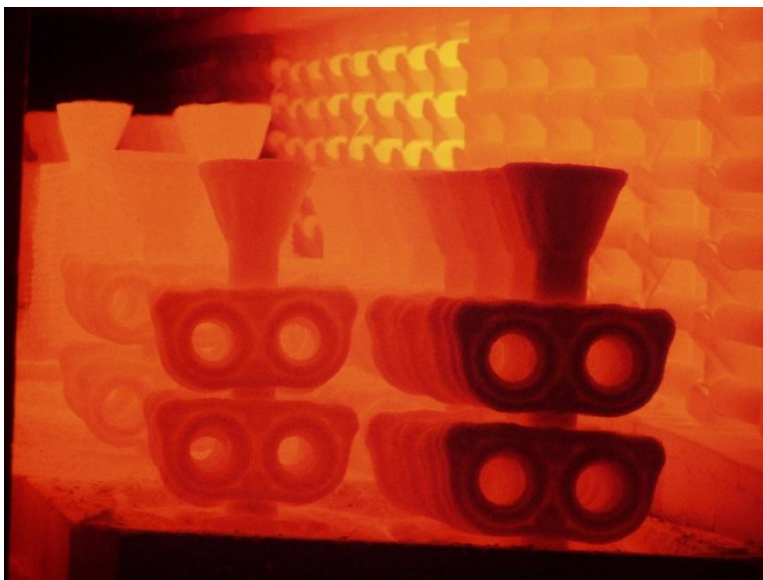
*Princip činnosti:* V zadní části (B) se vytvoří pára potřebná k činnosti zařízení. Ta přejde do části A. Při poklesu tlaku se vygeneruje skokově více páry a ta do 4 sekund obklopí skořepinu (viz obr. 35).



Obr. 35 Schéma boilerklávu [17]

## 6.2. Žihání skořepin [3]

Keramické skořepiny je nutno před odléváním vypálit (viz obr. 36). Výsledné formy jsou pak schopny odolávat velmi vysokým teplotám a při pečlivém výběru skladby keramické břečky a posypového materiálu mohou být používány pro velmi širokou oblast slitin.



Obr. 36 Žihání skořepin [14]

### Existují tři důvody pro vypalování forem před odléváním:

- *Odstranění zbytkového materiálu* – pro odstranění všech nežádoucích látek, jako zbytkový vosk, voda nebo třeba alkohol. Pro odstranění všeho je zapotřebí zahřát skořepinu až na 1000 °C.
- *Zhutnění struktury keramiky* – pro dosažení potřebné tvrdosti a pevnosti skořepiny, tedy převod amorfni vazná struktura SiO<sub>2</sub> na strukturu krystalickou [5].
- *Předehřátí formy* – pro snížení teplotního šoku, a následnému zabránění praskání

Pro vypalování je potřeba kyslík, a je proto důležité zajistit jeho dostatek ve vypalovacích pecích k odstranění jakéhokoli zuhelnatěného vosku.

Vypalovací atmosféru je potřeba pravidelně kontrolovat, obzvlášť pro odlitky z oceli a vysoce legovaných slitin, protože na povrchu formy je potřeba zabránit reakci kovu se zbytkovým uhlíkem z nedostatečného vypálení vosku. Minimální teplota při vypalování by měla být přes 500°C avšak výhodnější je zvýšit tuto teplotu na 800°C k zajištění rychlého odstranění zbytků [1].

Vypalování forem začíná při teplotě 300-400°C, díky tomu skořepiny překonají teplotní ráz a následná pomalá rychlost ohřevu dovolí postupné prohřívání skořepin bez odlupování jednotlivých vrstev a praskání. Po vyrovnání teplot dochází k dalšímu zahřívání. Až zhruba do teploty 575°C, kdy dochází k objemovým změnám a proto je zde výdrž po dobu 30 minut. Pak následuje další ohřev na požadovanou teplotu. Pro usměrněné tuhnutí je podstatné, aby kov zůstal po určitou dobu v tekutém stavu (tedy na teplotě přes 1500°C).

Nějaké speciální slitiny mohou požadovat ještě vyšší teplotu formy, ale použití keramiky na základě křemičitanů je omezeno teplotou okolo 1550°C – která se blíží bodu tavení křemičitanu. V jiných případech, obzvláště u slitin s nízkým bodem tavení, je maximální teplota vypalování ohraničena hodnotou 850°C, je to v první řadě k omezení zvyšování pevnosti formy při vypalování. Příliš vysoká pevnost skořepiny zde může být příčinou trhlin a prasklin vznikajících při smršťování odlitku. Vyžíhaná skořepina je po vizuální kontrole celistvosti připravena k odlévání.

## 7 ODLÉVÁNÍ KOVU DO SKOŘEPINY

Tavení a odlévání kovů je pro výrobu kvalitních přesných odlitků jedním z nejdůležitějších procesů celé technologie. Je to do jisté míry proto, že při výrobě technologií přesného lití na vytavitelný model je používána široká škála výrobků a slitin [3].

Odlévá se zpravidla ihned po vytažení z vypalovací (žíhací) pece. Jak již bylo uvedeno, zmenší se tím teplotní šok při lití, omezí se vznik vnitřních pnutí ve skořepinách a sníží se nebezpečí praskání.

Ve většině sléváren přesného lití na vytavitelný model se používá elektrických indukčních pecí jádrových či bez-jádrových nebo vakuových pecí. Tavení a odlévání slitin s nejvyššími požadavky na kvalitu se provádí ve vakuu.

### Metody odlévání

#### a) Gravitační lití

Skořepina je umístěna na lící pole, kde je do ní vylit kov, který pro své zatečení využívá jen svoji vlastní hmotnost (viz obr. 37)



Obr. 37 Odlévání kovu do skořepiny [14]



**b) Lití ve vakuu**

Nejprve se vysaje veškerý vzduch a pak se postupným uvolňováním podtlaku odlévá (viz obr. 38). Výhody spočívají ve velmi dobré kvalitě (žádné vzduchové bubliny). Nevýhoda spočívá ve vysoké ceně a nevelké produktivitě.



Obr. 38 Vakuová komora [18]

**c) Sklopné lití**

Forma je připevněná k peci a nakloněním pece vteče kov do formy (viz obr. 39).



Obr. 39 Sklopné lití [6],[19]

## 8 DOKONČUJÍCÍ OPERACE

### 8.1. Hrubé odstranění skořepiny [1],[3],[8]

Po ztuhnutí kovu je nutno odstranit keramickou vrstvu. Tato operace je někdy poměrně komplikovaná, protože pevnost skořepiny po odlití bývá vysoká.

Ve většině případů, je keramika odstraňována mechanicky. Účinným způsobem je vibrační oklepávání (viz obr. 40). Tuto operaci lze označit za nejvíce prašnou a hlučnou ve slévárnách přesného lití na vytavitelný model. V současnosti se proto používá zvukotěsná a prachotěsná kabina, kde je umístěn vibrační stroj či vibrační kladivo. Nově používaným způsobem odstraňování keramické skořepiny je tryskání vysokotlakým paprskem [1].



Obr. 40 Tryskací zařízení s drátěným pásem [20]

### 8.2. Oddělení odlitků od vtokového systému [3],[8]

Ve většině případů jsou odlitky oddělovány z vtokové soustavy kotoučovými nebo třecími pilami. Hliníkové odlitky jsou oddělovány pásovými pilami.

### 8.3. Odstranění zbytků skořepiny [3],[8]

Po odřezání od stromečku je potřeba se zbavit zbytků keramiky, která zůstala v těžce přístupných místech nebo v dutinách.

**Chemické metody** - K odstranění žáropevných zbytků lze použít fluorovodíkové kyseliny, avšak většinou se používá chemické čištění využívající žíravé soli nebo soli v roztavené formě jako vodní roztok. Odstranění keramiky chemickou metodou se používá až po odstranění většího (prvotního) objemu skořepiny jinou metodou. Je samozřejmě možné odstranit celou skořepinu chemicky, avšak bylo by to cenově neefektivní [3].

- 1) *Lázeň s rozpuštěnou solí* – je z hydroxidu sodného, s vyrovnávacími aditivy. Sůl je rozpuštěna v ocelové vaně a pracovní teplota lázně je v rozmezí 475 – 600°C. Rozpuštěná sůl dobře odstraní zbytky křemičitanů obsahující keramiku. Doba ponoření odlitků je okolo 20 minut.
- 2) *Horká vodní žíravá lázeň* – tyto lázně operují s alkalickými koncentráty, obvykle s hydroxidem draselným. Pracovní teplota je okolo 80°C a odlitky jsou ponořovány do roztoku na několik. Po očištění jsou odlitky důkladně oplachovány horkou vodou a následně sušeny.

***Abrázivní metody*** – Tyto metody lze rozdělit na dvě odlišné metody, tlakové tryskání a tryskání bez použití vzduchu.

- 1) *Tlakové tryskání* – používá jako média obvykle vzduch nebo vodu, které dopravuje velkou rychlostí abraziva na trykaný povrch
- 2) *Tryskání s vodním zdrojem* – lze dále rozdělit do dvou skupin: otevřené tryskání vodním paprskem a tryskání vodním paprskem v uzavřené jednotce.
- 3) *Otevřené tryskání* – Tato technika používá k odstranění velké části skořepiny vysokotlaký vodní paprsek. Tato metoda je analogická s metodou odstraňování keramiky pomocí vibračního kladiva.
- 4) *Uzavřené tryskání* – Používá vysokotlaký vodní paprsek k vytvoření koherentního proudu o vysoké rychlosti, který dopadá na keramiku.
- 5) *Tryskání bez použití vzduchu* – stroje pro tuto metodu nepoužívají stlačený vzduch k vrhání abraziva na pracovní povrch. Místo toho jsou abrazivní částice (ocelové broky, keramická drť) vrhány pomocí lopatkového kola [3].

#### **8.4. Dokončující operace [3]**

Mezi závěrečné operace se řadí celá škála úkonů, které následují hned po oddělení ze stromečku, jako třeba obrábění (pokud je to třeba), odjehlování, úpravy povrchu, nebo třeba i kalení, a následné broušení.

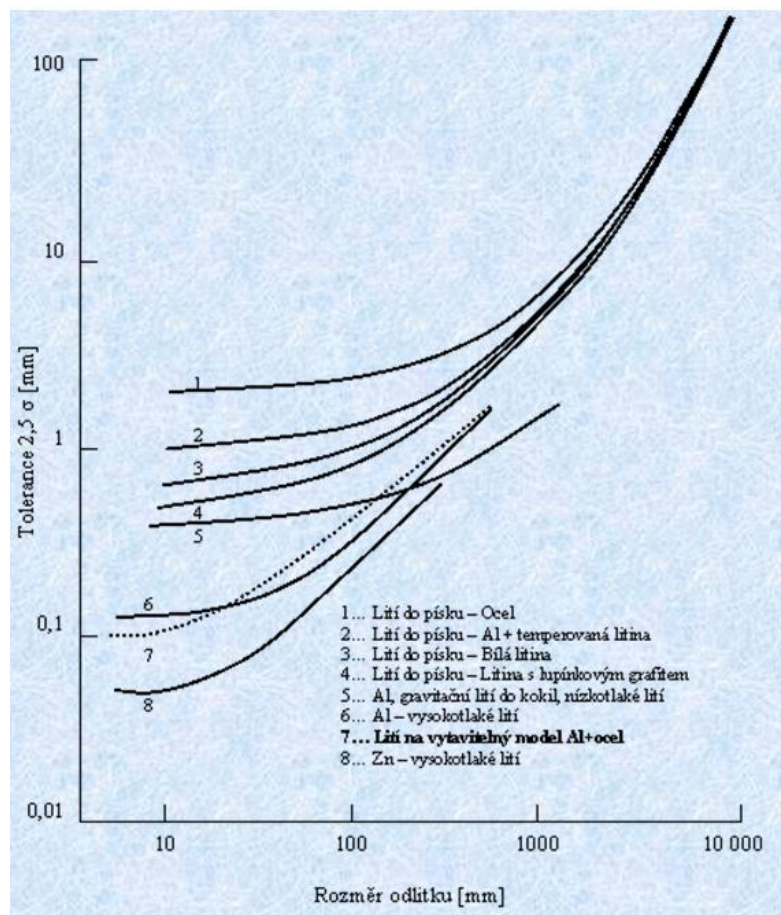
#### **8.5. Kontrola jakosti odlitku [3]**

Jednou s největších předností metody vytavitelného modelu je rozměrová a tvarová přesnost výroby. Právě proto je třeba dbát na kontrolu jak rozměrovou tak kontrolu tvaru. Dalšími zkouškami, kterým se odlitky podrobují, jsou zkoušky struktury materiálu, dále nedestruktivní zkoušky vnitřním vad, zkoušky mechanických vlastností, netěsnosti apod.



Zkoušky se dělí do následujících kategorií:

**Metody pro rozměrovou kontrolu** – kontrola se provádí pomocí mikrometrů, ručních či automatických měřidel, souřadnicových měřicích systémů a tří – rozměrných automatických měřicích systémů.



Obr. 47 Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu ve srovnání s ostatními metodami [6]

**Metody pro zjišťování kvality povrchu** – kontrolují se trhliny a jiné povrchové vady. Způsoby kontroly jsou vizuální kontrola, chemické leptání, fluorescenční kapilární metoda, zkouška vířivými proudy a magnetická zkouška (která může odhalit vady situované přímo pod povrchem).

**Metody pro zjišťování vnitřních vad (nedestruktivní metody)** – nedestruktivní metody lze systematicky rozdělit na optické, penetrační, magnetické, vířivé proudy, ultrazvukové a rentgenové. Ve slévárnách odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu jsou dominantní metody vizuální, penetrační a rentgenové [1].

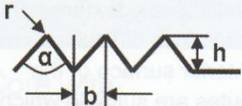
## 9 POHLED DO BUDOUCNOSTI

### 9.1. Povrchy se „žraločí kůží“ [21]

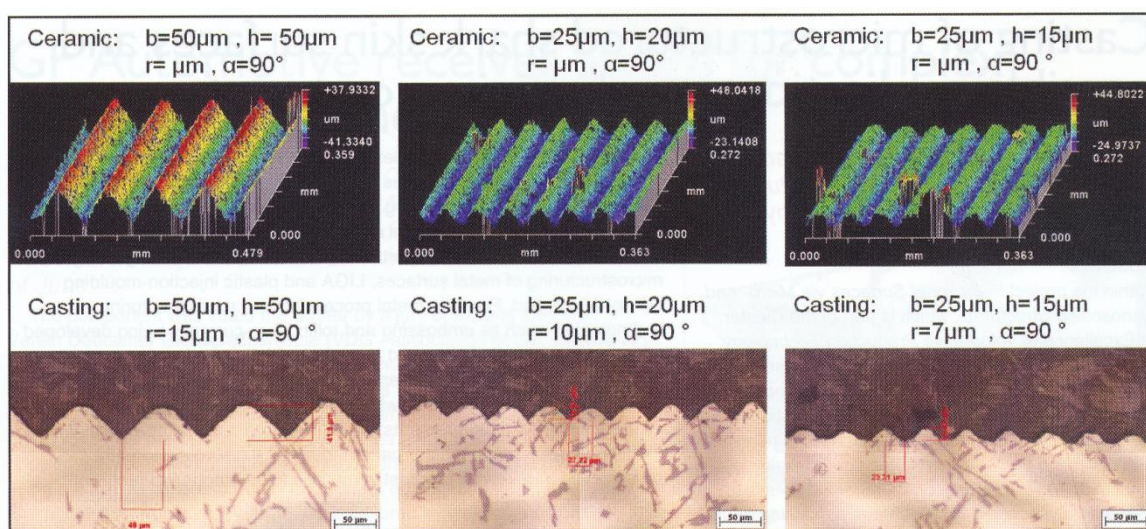
Je to jedna z mnoha inovací, na které se v dnešní době pracuje. Jedná se o tzv. žraločí povrch na výrobku, který má být dosažen, právě vlastním odlitím. Jedná se o povrch, který by měl vyšší třecí koeficient, zmenšenou reflektivitu a hlavně vysokou hydrofobii (tj. nesočivost). Spousta takových povrchů je již známá, jako např. žraločí kůže, listu lotosu a oči a nohy motýlů (a dalšího podobného hmyzu) a další.

Tyhle povrchy se již dají vyrábět za pomoci odpařování materiálu laserem, anebo elektrodami. Tyhle metody ale nejsou ekonomické a dlouho trvá výroba, je tedy metoda, kterou by se takové povrchy dali vyrobit opravdu žádaná.

V dnešní době je již realizovatelné za pomoci metody vytavitelného modelu vyrobit povrchy, které mají rýhy široké 25  $\mu\text{m}$  a dlouhé 15  $\mu\text{m}$  (viz obr. 42 a obr. 43). Při odlévání slitiny hliníku AlSi7. Výzva zůstává zhotovení rohů s poloměrem menším jak 1  $\mu\text{m}$ . Což by bylo obzvláště užitečné pro snížení odporu vzduchu u aut, formulí, apod.

Geometry	b [ $\mu\text{m}$ ]	h [ $\mu\text{m}$ ]	r [ $\mu\text{m}$ ]	$\alpha$ [°]
	50	50	4.5	90
	25	20	4.5	90
	25	15	4.5	90

Obr. 42 Geometrická velikost mikrostruktur povrchu [21]



Obr. 43 Naměřené výsledky interferometrem pomocí bílého světla (nahore) a měření leštěného vzorku odlitku v mikro-měřítku (dole) [21]

## 9.2. Použití v lékařství [6],[22]

V dnešní době nacházejí přesné odlitky čím dál větší použití i ve zdravotnictví, jako třeba v kloubní náhradě (viz obr. 44). Ovšem nevýhodou bylo, že odlitek nebyl dříve tam přesný, proto se musela kost osekát. Aby k těmto zákrokům nemuselo docházet, dbá se na vysokou přesnost těchto odlitků.

Finanční náklady těchto odlitků jsou stále příliš vysoké, proto se jedná spíše o další cíl metody vytavitelného modelu.



Obr. 44 Ukázky kloubních implantátů [6],[22]

## 9.3. Použití v leteckém průmyslu [1]

Pro zlepšení struktury jsme schopni řídit směr tuhnutí, a tudíž vytvořit jeden velký monokrystal. Tohle je využíváno především u lopatek motorů letadel, kde je rovnoosá struktura vítaná.

Zájem o slévarenskou technologii, která je schopná poskytnout nejen rozměrově přesný odlitek, ale také odlitek s co nejkvalitnější strukturou, stále roste. A to nejen v leteckém průmyslu (viz obr. 45 a obr. 46), ale také v kosmonautice.



Obr. 45 Součást pro letecký a vojenský průmysl[23]



Obr. 46 Součást leteckého motoru GE (Boeing 747,767) – slitina Ti [6]

## ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo vypracování literární rešerše ohledně problematiky technologie vytavitelného voskového modelu a jeho stavu v současnosti. Práce obsahuje seřazení jednotlivých fází výrobního procesu od zhotovení formy pro výrobu voskového modelu, až po konečné úpravy odlitku a jeho kontrolu. Práce se dále ubírá pohledem na inovace a nové možnosti a cíle, ke kterým by se další vývoj technologie mohl ubírat.

V první části jsou uvedeny a vysvětleny nejnovější způsoby testování vosků. Dané metody jsou popsány spíše okrajově. Dále jsou stručně popsány následující fáze metody, a závěr je věnován stručnému přehledu oblastí využití odlitků vyrobených metodou vytavitelného modelu.

Technologie vytavitelného voskového modelu je velmi progresivní technologie, která je schopna výrobek zhotovit „na hotovo“, tedy bez dalších dokončovacích operací. Díky tomuto faktu je technologie schopná konkurenceschopnosti oproti ostatním technologiím.



**SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] BEELEY, P. R.; SMART, R. F. *Investment Casting*. 1 st ed. Cambridge, UK: The University Press, 1995. 486 s. ISBN 0-901716-66-9.
- [2] HORÁČEK, Milan. *Technologie vytavitelného modelu: Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu* [online]. Brno: Odbor slévárenství ÚST, FSI VUT Brno, 2009 [cit. 2013-04-6]. Dostupné z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory.html>
- [3] HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model* [online]. Praha: Skupina slévání ÚST, FS ČVUT Praha, 2009. 30 s. Disertační práce. [cit. 2013-03-24]. Dostupné z WWW: <http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/MPL/presne%20liti%20na%20vytavitelny%20model.pdf>
- [4] *West African Art and Culture* [online]. 2003 [cit. 2013-04-6]. Dostupné z WWW: <http://academics.smcvt.edu/africanart/Arianne/cast%20brass%20heads.htm>
- [5] Hanzl, S.; Růžička, A.: *Metalurgie a technologie slévarenských slitin – díl II*, Praha, ČVUT, 1986
- [6] HORÁČEK, Milan. *Výroba přesných odlitků: Výroba přesných odlitků technologií vytavitelného modelu* [online]. Brno: Odbor slévárenství ÚST, FSI VUT Brno, 2009 [cit. 2013-04-6]. Dostupné z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory.html>
- [7] *Slevarenstvi.cz* [online]. 2000 [cit. 2013-04-6]. Dostupné z WWW: <http://www.slevarenstvi.cz/text/Obr4.jpg>
- [8] Doškár, J.; Gabriel, J.; Houšť, M.; Pavelka, M.: *Výroba přesných odlitků*, Praha, SNTL, 1976
- [9] HIRST, Richard; OLEFINES, Blayson. *Composition, Control and Use of Investment Casting Wax* [online]. 2007. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z WWW: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl14.pdf>.
- [10] BOND, D. - MORSON, D. - HANCOCK, P. - HORÁČEK M. *Pokroky při testování vosků ovlivňující jejich další rozvoj*. 2012, roč. 60, 9-10, s. 337-341. DOI: 0037-6825.
- [11] HANCOCK, Phil. *Wax Fundamentals and Use with Ceramic Cores* [online]. 2007 [cit. 2013-05-05]. Dostupné z WWW: <http://www.investmentcastingwax.com/downloads/tl15.pdf>.
- [12] *Investacast.com* [online]. 2011 [cit. 2013-04-6]. Dostupné z WWW: <http://www.investacast.com/Portals/0/images/patternMixer.jpg>
- [13] *Jade-trading.com* [online]. 2012 [cit. 2013-04-6]. Dostupné z WWW: <http://www.jade-trading.com/index.php?casting=investment-castings-lost-wax-casting>

- [14] *Agro-tuřany.cz* [online]. 2011 [cit. 2013-04-6]. Dostupné z WWW: <<http://www.agro-turany.cz/24768-slevarna>>
- [15] *Pi-castings.co.uk* [online]. 2010 [cit. 2013-03-24]. Dostupné z WWW: <<http://www.pi-castings.co.uk/investment-casting-process.htm>>
- [16] *Craftcastco.com* [online]. 2008 [cit. 2013-03-24]. Investment Casting Equipment. Dostupné z WWW: <<http://www.craftcastco.com/investment-casting-equipment/drying-room.html>>.
- [17] PICKARD, Howard. *Mould dewaxing: Seminar*, Brno. 2007. 20 s.
- [18] *Multistation* [online]. 2008 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.multistation.com/CSV-MINI-389>>
- [19] *Investcast* [online]. 2011 [cit. 2013-05-12]. Wax Pattern Production. Dostupné z WWW: <[http://www.investacast.com/metal\\_casting.aspx](http://www.investacast.com/metal_casting.aspx)>
- [20] *Konrad Rump* [online]. 2009 [cit. 2013-05-12]. Výrobky. Dostupné z WWW: <<http://www.rump-oft.de/26-Products/38-Wire-Belt-Machines.html>>.
- [21] TODOR, I; BUHRIG-POLACZEK, A; VROOMEN, U. *Casting of microstructured shark skin surfaces and possible applications on aluminium část parts*. 2011, roč.8,1, s 259-262 ISSN: 0143-6902.
- [22] *Nemocnice* [online]. 2011 [cit. 2013-05-12]. Endoprotézy. Dostupné z WWW: <<http://www.nemcb.cz/cz/page/76/Endoprotezy.html?detail=395>>
- [23] *Global sources* [online]. 2010 [cit. 2013-05-12]. Aircraft parts. Dostupné z WWW: <<http://www.globalsources.com/gso/I/Aircraft-part/p/sm/1046921480.htm>>

## Seznam obrázků:

- Obr. 1 Bronzová hlava Královny Matky z kmene Benin v Nigérii
- Obr. 2 Postup zhotovení bronzového náramku metodou vytavitelného vosku
- Obr. 3 Odhadované stáří předmětů vyrobené metodou vytavitelného modelu
- Obr. 4 Equestrian monument, renesanční Itálie, bronz, rok 1620
- Obr. 5 Jednotlivé části metody
- Obr. 6 Ocelová forma
- Obr. 7 Výroba formy zalitím modelu ze sádry
- Obr. 8 Forma z nízkotavitelné slitiny
- Obr. 9 Výroba formy za použití galvanoplastiky
- Obr. 10 Výroba formy pomocí metalizace
- Obr. 11 Voskové směsi
- Obr. 12 Bod tuhnutí voskové směsi
- Obr. 13 Zkouška bodu skápnutí
- Obr. 14 Spirála pro zkoušku zabíhavosti voskových směsí
- Obr. 15 Schéma metody FTIR
- Obr. 16 Výsledný otisk vzorku z FTIR
- Obr. 17 Kelímky na společném ohříváči
- Obr. 18 Ukázka DSC křivky
- Obr. 19 Ukázka reometru s kontrolovaným smykovým napětím
- Obr. 20 Schéma reometru
- Obr. 21 Příklad z výsledků reometru
- Obr. 22 Regenerace voskové hmoty
- Obr. 23 Schéma vstřikovacího stroje
- Obr. 24 Zařízení pro výrobu modelu
- Obr. 25 Vstřikovací stroj
- Obr. 26 Sestava jednoho modelu
- Obr. 27 Jednotlivé části stromečku
- Obr. 28 Stromeček
- Obr. 29 Stromečkové sestavy
- Obr. 30 Namáčení voskového modelu v břechce
- Obr. 31 Posypání modelů keramickým materiálem
- Obr. 32 Sušení keramických skořepin
- Obr. 33 Dilatační spára
- Obr. 44 Boilerkláv
- Obr. 45 Schéma boilerklávu
- Obr. 46 Vypalování skořepin
- Obr. 47 Odlévání kovu do skořepiny
- Obr. 48 Vakuové lití
- Obr. 49 Sklopné lití
- Obr. 50 Tryskací zařízení s drátěným pásem
- Obr. 51 Rozměrová přesnost
- Obr. 52 Geometrická velikost mikrostruktur povrchu
- Obr. 53 Naměřené výsledky
- Obr. 54 Ukázky kloubních implantátů
- Obr. 55 Součást pro letecký průmysl
- Obr. 56 Součást leteckého motoru GE

